

**Über die Verdeckung sinusförmiger und schmalbandiger
Vibrationen auf der Haut des Unterarms an einem
zur Sprachkommunikation verwendbaren Modell
der menschlichen Cochlea**

von

Rudolf Weinzierl

aus Regensburg

Aus dem I. Physiologischen Institut der
Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. W.D. Keidel

Über die Verdeckung sinusförmiger und schmalbandiger
Vibrationen auf der Haut des Unterarms an einem zur
Sprachkommunikation verwendbaren Modell der mensch-
lichen Cochlea.

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von
Rudolf Weinzierl
aus Regensburg

Hiltraud Rosenbauer
gewidmet

Gedruckt mit der Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg.



Dekan: Professor Dr. A. Kröncke

Referent: Professor Dr. W.D. Keidel

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 1969

ZUSAMMENFASSUNG.

Es wurden zwei volltransistorisierte Sinusgeneratoren entworfen und aufgebaut, die es erlauben, zwei unabhängige Sinusschwingungen fein abstufbarer Frequenz zu erzeugen.

An einem System, bestehend aus dem bekannten mechanischen Modell der menschlichen Cochlea (Bekešy) in Verbindung mit der Haut des Unterarms, das zur Sprachübertragung (Keidel) verwendbar ist, und welches ähnlich wie das Innenohr Dispersionseigenschaften aufweist, wurde die Verdeckung zweier gleichzeitig einwirkender sinusförmiger Vibrationen bestimmt.

Die vibratorischen Mitfühlschwellen weisen, wenn man die unterschiedlichen Frequenzbereiche von Ohr und Haut berücksichtigt, einen vergleichbaren Verlauf wie beim Gehör auf. Es konnte weiterhin gezeigt werden, daß bei Verdeckung komplexerer Vibrationsmuster, wie sie durch schmalbandige Schwingungen hervorgerufen werden, eine signifikante Verbreiterung der Verdeckungskurve auftritt.

Auf Grund dieser, im Vergleich zum Gehör relativ breiten, Mitfühlschwellen konnte eine Zusammenschaltung bestimmter Frequenzbereiche, wie sie beim Gehör in der Art der Frequenzgruppe vorliegen, bei der Informationsverarbeitung der Haut nicht nachgewiesen werden.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546218_0077

INHALTSVERZEICHNIS.

1. Einleitung.	Seite 1
1.1 Sprachkommunikation über die Haut.	Seite 1
1.2 Verdeckungsmessung am Gehör.	Seite 2
2. Problemstellung.	Seite 3
3. Vibrationssystem.	Seite 4
3.1 Allgemeines.	Seite 4
3.2 Cochleamodell.	Seite 5
3.3 Frequenzgang des Systems.	Seite 6
4. Tieftongenerator.	Seite 7
4.1 Aufbau.	Seite 7
4.2 Eichung.	Seite 10
5. Schwellenmessungen.	Seite 11
5.1 Schwellenmessungen am Vibrationssystem.	Seite 11
5.2 Schwellenmessung am Cochleamodell unter Benutzung der Fingerbeere.	Seite 13
5.3 Schwellenmessungen am Cochleamodell unter Benutzung des Unterarms.	Seite 15
5.4 Vergleich der Schwellenmessungen.	Seite 16
5.5 Erregungsverteilung auf dem Modell.	Seite 17
5.6 Schwellenvergleich zwischen Ohr und Haut.	Seite 18
6. Verdeckung einer Vibration durch eine benachbarte.	Seite 20
6.1 Problemstellung und Versuchsanordnung.	Seite 20
6.2 Auswertung der Meßergebnisse.	Seite 21
6.3 Beschreibung der Versuchsergebnisse bei Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch eine benachbarte andere.	Seite 23

a) Störvibration 110 Hz	Seite 23
b) Störvibration 320 Hz	Seite 26
7. Verdeckung einer sinusförmigen Vibration auf dem Cochleamodell durch eine Vibration, die durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz erzeugt wird	Seite 29
7.1 Problemstellung und Versuchsanordnung.	Seite 29
7.2 Auswertung der Meßergebnisse.	Seite 30
7.3 Beschreibung der Versuchsergebnisse bei Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration.	Seite 31
8. Vergleich der Verdeckung von Sinustönen durch Sinustöne oder Schmalbandrauschen am Ohr und der Verdeckung von sinusförmigen Vibrationen durch sinusförmige Vibrationen oder Schmalbandrauschen als Vibration auf der Haut des Unterarms am Cochleamodell.	Seite 35
8.1.a) Verdeckung eines Prüftones durch einen benachbarten Störton.	Seite 35
8.1.b) Verdeckung einer sinusförmigen Prüfungsvibration durch eine benachbarte Störvibration.	Seite 35
8.2.a) Verdeckung eines Sinustones durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz.	Seite 36
8.2.b) Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz als Störvibration.	Seite 37
9. Diskussion.	Seite 40
10. Literaturverzeichnis	Seite 44
11. Anhang	Seite 45
12. Lebenslauf	Seite 46

1. EINLEITUNG.

1.1 Sprachkommunikation über die Haut.

Zur Zeit existieren mindestens vier brauchbare Verfahren, Sprache über den Vibrationssinn dem gnostischen Zentralapparat zuzuführen und in verhältnismäßig kurzer Zeit dieses "Hautsprachverständnis" soweit zu üben, daß damit etwa 95% Silbenverständlichkeit erreicht wird. (Keidel 1964).

Wie Keidel weiterhin berichtet ist der zentrale Teil der Fühlbahn allem Anschein nach ebenso leistungsfähig, wie derjenige der Hörbahn.

Die Anklingzeit der Rezeptoren von Ohr und Haut verhält sich wie 0,18 zu 1,2 Sekunden. Solange dauert es, bis eine Hör- bzw. Receptionsempfindung voll angekommen ist, wenn der adäquate Reiz den Sinnesorganen mit konstanter Reizstärke angeboten werden kann. Die Haut reagiert also 8-fach träger als das Ohr. Das bedeutet, daß der Haut pro Zeiteinheit nur ein Achtel des Informationsflusses des Gehörs zugemutet werden kann. Außerdem liegt die Absolutschwelle beim Ohr bei 2000 Hz, während sie auf der Haut bei 200 bis 300 Hz liegt. Auch hier taucht also wieder der Faktor 8 als Unterschied auf. Diesen Tatsachen wurde bei der Messung der Sprachkommunikation durch die menschliche Haut am Wellengeschwindigkeits-Dispersionsmodell für Vibrationsreize von G.v. Bekešy Rechnung getragen (Keidel, Biber 1961).

Das Hauptsprachgebiet von 300 bis 3000 Hz wurde dabei im Verhältnis 1 : 8 untersetzt und über die 30 Zentimeter lange Kunststoffmembran eines Cochleamodells (Bekešy, Biber) auf der Haut des Unterarms zur Reception gebracht. Das Modell ist in der Lage, Frequenzen von 40 bis ca. 500 Hz zu übertragen.

Der grundlegende Vorteil des Cochleamodells gegenüber den anderen Methoden der Sprachkommunikation

über die menschliche Haut ist die Erhöhung der Zahl der gleichzeitig für den Informationsfluß beanspruchten Hautreceptoren so, daß sie mit derjenigen der Ohrsinneszellen vergleichbar wird. Nachdem ferner durch laterale Hemmung die neurale Netzwerkschaltung der Haut in beträchtlichem Umfang kontraststeigernd wirkt, kann damit erreicht werden, daß sowohl die Ortsschwelle voll ausgenutzt werden kann, wie die Zahl der für den Informationsfluß verfügbaren Receptoren gegenüber der Verwendung getrennter Vibratoren beträchtlich erhöht wird (Keidel). Praktische Versuche (Biber) haben dementsprechend auch die prinzipielle Anwendbarkeit dieser theoretischen Gedankengänge voll bestätigt. Eine beim Vergleich zwischen Ohr und Haut auffallende, für später beschriebene Messungen wichtige Tatsache ist der bei beiden Systemen unterschiedliche Intensitätsbereich. Es ist bekannt (Keidel), daß der Intensitätsbereich für akustische Reize 130 dB, für Vibrationsreize jedoch nur 35 dB überstreicht.

1.2 Verdeckungsmessung am Gehör.

Wenn zwei Sinustöne (Zwicker), von denen einer konstante Frequenz und Intensität beibehält (Störton), der andere aber durch das verfügbare Frequenzspektrum wandert (Prüftön), in ihrer gegenseitigen Beeinflussung untersucht werden, ergibt sich, daß der Störton den Prüftönen über einen bestimmten konstanten, frequenzspezifischen Bereich hin verdeckt. Ähnliche Ergebnisse zeigt die Verdeckung eines einzelnen Sinustones durch weißes Rauschen oder Schmalbandrauschen.

Allgemein wird bei allen Störtönen, unabhängig von ihrer Lage im Frequenzspektrum bei niedrigen Schalldrücken die Hörschwelle symmetrisch zu dieser Frequenz angehoben. Bei Ansteigen über einen Wert von 60 dB wird jedoch die Mithörschwelle zunehmend unsymmetrisch.

Das sieht am Beispiel eines Störtones von 1 KHz bei sehr großer Lautstärke so aus, daß nach der tiefen Frequenz zu kaum eine Oktave, nach der höheren Frequenz hin aber mehr als 3 Oktaven verdeckt werden. Bemerkenswert ist, daß die Mithörschwellen des Terz-Rauschens viel symmetrischer verlaufen, als die gleich-hohen Mithörschwellen reiner Töne.

Voraussetzung für das bisher geschilderte Verhalten des Gehörsinnes sind unter anderem die morphologischen Gegebenheiten des menschlichen Innenohres (in Sonderheit der Basilarmembran mit ihren Haarzellen) und die Dispersionswellen, die vom ovalen Fenster her im frequenzabhängigen breiten Bereich die Basilarmembran zu Schwingungen anregen, deren Ort als Frequenz und deren Amplitude und Ausdehnung als Intensität des Reizes zum Zentralnervensystem gemeldet werden.

Weiterhin ist noch erwähnenswert, daß der enge Zusammenhang zwischen Gehörsinn und Hautsinn daraus erklärt werden kann, da das Gehör der phylogenetische Nachfolger des Hautsinnes ist.

2. PROBLEMSTELLUNG.

Nach dem Gelingen der Sprachkommunikation durch das von G.v.Bekeşy angegebene mechanische Modell der menschlichen Cochlea auf der Haut liegt die Frage nahe, inwieweit Gehör und Hautsinn plus Cochleamodell miteinander verglichen werden können, wenn es um spezifische physiologische Leistungen des Gehörs geht.

Bei der kritischen Betrachtung des Cochleamodells muß zunächst danach gesucht werden, ob bei der Bestimmung der Intensitätsschwellen auf der Kunststoffleiste dieses Modells eine gemeinsame Basis mit anderen Autoren (Hugony, Setzepfand) und ihren Methoden der Schwellenmessung gefunden werden kann.

Eigentliches Ziel der vorliegenden Arbeit soll jedoch die Untersuchung darüber sein, inwieweit die Haut des Unterarms auf der Membran des Modells der menschlichen Cochlea ähnlich oder unterschiedlich reagiert, wenn es um das spezielle Problem der Verdeckung von Vibrationen geht. Dabei ist einmal zu prüfen, wie sich zwei Sinustöne gegenseitig verhalten, wenn ihr Frequenzabstand kontinuierlich geringer wird. Zum Anderen soll festgestellt werden, ob ein Schmalbandrauschen definierter Mittenfrequenz und Bandbreite einen Sinuston, der auf diese Mittenfrequenz zusteuert, beeinflussen kann.

3. VIBRATIONSSYSTEM.

3.1 Allgemeines.

Bei Untersuchungen über Vibrationsreception lassen sich grundsätzlich zwei Methoden zur Erzeugung von Vibrationen unterscheiden. Die eine, hauptsächlich in früheren Arbeiten angewandt, beruht auf der direkten mechanischen, die andere, im wesentlichen in neueren Arbeiten bevorzugt, auf der elektromagnetischen Erzeugung von Vibrationen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode der elektronisch erzeugten Schwingung gewählt. Dabei werden die Schwingungen durch einen Lautsprecher in mechanische Vibrationen transformiert, deren Frequenz und Amplitude jederzeit anhand der Lautsprecher-spannung zu kontrollieren ist.

Die Vibrationen werden entweder am Lautsprecher direkt (Vorversuche) oder an einem, entsprechend den Angaben von G.v.Bekeşy (Bekeşy 1955) am I. Physiologischen Institut aufgebauten (Biber 1961), mechanischen Modell der menschlichen Cochlea, das mit dem Lautsprecher gekoppelt werden kann, zur Reception gebracht.

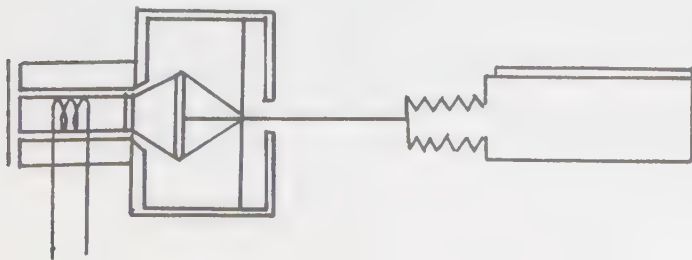
3.2 Cochleamodell.

Das mechanische Modell der Cochlea besteht aus einem dünnwandigen Messingrohr von 30 cm Länge und einem Innendurchmesser von 5,5 cm. Das Rohr ist auf der einen Seite mit bieguungssteifem Blech, auf der anderen Seite mit einer Druckdose aus Tombak verschlossen. Innerhalb dieser beidseitig verschlossenen Röhre mit einem, die gesamte Länge durchziehenden Spalt von 2,3 cm Breite wird ein Mantel aus Polyvenylplastik gezogen. Dieser bildet über dem Spalt eine Membran, deren Breite über die ganze Länge des Modells konstant bleibt, deren Dicke jedoch entsprechend der ortsabhängigen Steifheit der Basilarmembran der menschlichen Cochlea variiert. Der steifste Teil liegt in der Nähe der Druckdose. Entsprechend werden hier die höheren Frequenzen abgebildet. Dieser Teil der Membran des Modells entspricht der Basilarmembran in der Gegend des ovalen Fensters. Die Membran trägt eine Polyvenylleiste von 3 mm Kantenlänge. Sie vermittelt den Kontakt zwischen der Membran des Modells und z.B. dem aufliegenden Unterarm der Versuchsperson.

Das ganze Modell muß luftblasenfrei mit Wasser gefüllt sein.

Als Schwingungserreger dient ein Lautsprecher von ca. 10 Watt Endleistung. Auf seine Trichtermembran ist ein Stahlstift zentriert und fixiert. Die Kopplung von Modell und Lautsprecher erfolgt über die verschraubte Verbindung von Stahlstift und Druckdose.

Querschnitt durch das Lautsprecher-Modell-System:
(Abbildung 1).



3.3 Frequenzgang des Systems.

Zur Bestimmung der als Störfaktor bei den Messungen auftretenden physikalischen Eigenschaften des Lautsprecher-Modell-Systems wurde erstens am Lautsprecherfortsatz ein unelastischer Metallstift senkrecht nach unten angelötet. Die Spitze des Stiftes berührte eine berußte Glasplatte, die bei variabler Frequenz und variabler Lautsprecherspannung die jeweilige Auslenkung der Lautsprechermembran aufzeichnete.

Zweitens wurden anstelle des Metallstiftes auf Rasierklingenstahl aufgeklebte Dehnungsmeßstreifen starr an Lautsprecherfortsatz und Unterlage montiert.

Die Meßschaltung war dabei eine Brücke, deren vier Glieder aus vier Dehnungsmeßstreifen, Typ PR 9812 der Firma Phillips bestanden. Zwei der Dehnungsmeßstreifen wurden auf Rasierklingenstahl aufgeklebt, die beiden anderen dienten als Abgleichwiderstände. Als Spannungsquelle wurden zwei in Serie geschaltete 6-Volt Bleiakkumulatoren verwendet. Die Brückenspannung wurde oscillographisch gemessen.

Auf diese Weise konnten die Ergebnisse der Rußschreibung ergänzt und insbesondere die Frequenzabhängigkeit des Systems im Bereich bis 40 Hz bei Lautsprecherspannungen von 50 bis 900 mV erfasst werden. Aus der Auswertung der Rußkurvenschreibung geht hervor, daß eine Auslenkung des Lautsprecherfortsatzes bei gekoppeltem Modell von 25μ einer angelegten Lautsprecherspannung von 250 mV entspricht.

Die Meßwerte der Dehnungsmeßstreifen wurden in Abhängigkeit von der Frequenz mit der angelegten Lautsprecherspannung als Parameter graphisch in Abbildung 2 dargestellt.

Es zeigt sich, daß eine nennenswerte Abweichung von der Linearität (beginnende Resonanz) nur bei Frequenzen unterhalb 40 Hz abhängig von der angelegten Lautsprecherspannung auftritt.

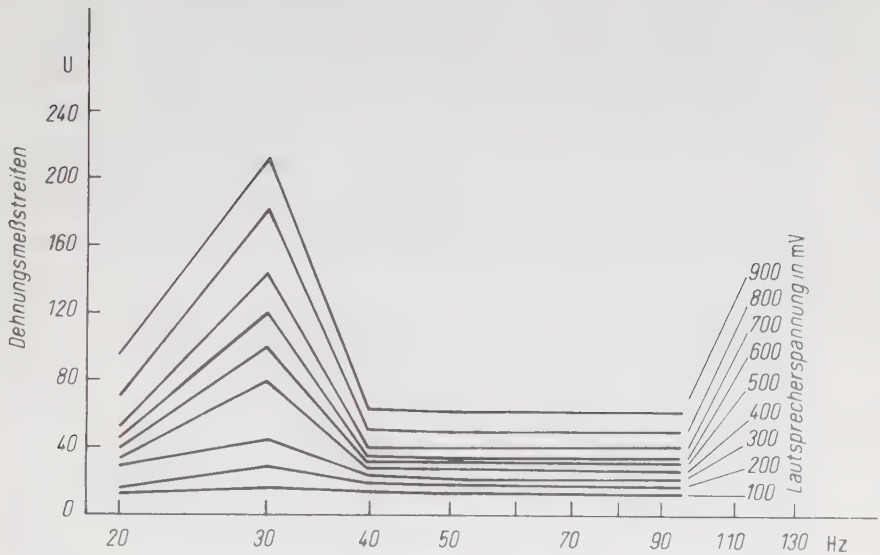


Abbildung 2. Spannung an der Dehnungsmeßstreifenbrücke in Abhängigkeit von der angelegten Lautsprecher-spannung und der Frequenz der Sinusschwingung.

4. TIEFTONGENERATOR.

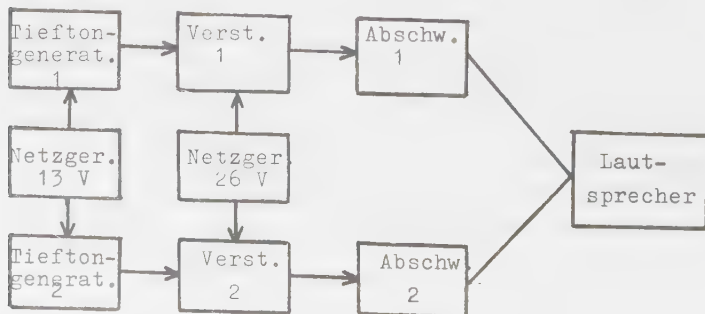
4.1 Aufbau.

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit befaßt sich mit dem Bau zweier Tieftongeneratoren. Die gesamte elektronische Versuchsanordnung wurde nach im Prinzip bekannten (Intermetall, Valvo), von uns wesentlich modifizierten Plänen volltransistorisiert im Steckkartensystem selbst gebaut.

Erwähnenswert hinsichtlich des Aufbaues der Tieftonsinusgeneratoren (siehe Schaltbild im Anhang!) sind:

- a) Zwei Helipot-10-Wendelpotentiometer mit einem Widerstandsbereich bis 10 KOhm. Der geringe Gleichlauffehler der Potentiometer läßt grobe Verzerrungen vermeiden. Das hohe Auflösungsvermögen der Helipot Wendelpotentiometer ermöglicht zusammen mit dem Digitalantrieb von 1000 Teilstrichen auf 10 Umdrehungen genaueste Frequenzeinstellung. Im Bereich von 20 bis 650 Hz ist dadurch der Generator auf 1 Hz genau einstellbar.
- b) Die drei Umschaltbereiche, die durch Änderung der Kapazität des frequenzbestimmenden Gliedes entstehen. Dabei entspricht der Kapazität von 1 μ F die Frequenzbreite 14 - 164 Hz, der Kapazität von 0,47 μ F das Frequenzspektrum von 34 - 376 Hz und der Kapazität von 0,15 μ F das Spektrum von 109 - 1184 Hz. Die verfügbare Frequenzbreite liegt somit zwischen 14 und 1184 Hz.
Bei Überschneidungen der Eichkurven für die einzelnen Umschaltbereiche wird im Versuch diejenige Eichkurve verwendet, die den höherfrequenten Schenkel der jeweils insgesamt tieferfrequenten Eichkurve überschneidet. Das verbessert die Einstellgenauigkeit.
- c) Die zur Stabilisierung verwendeten Glühlämpchen von 6V/0,3W.

Blockschaltbild der Versuchsanordnung: (Abbildung 3)



Da sich die Endleistung der Tieftongeneratoren als zu gering erwies, wurden zwei Verstärker aufgebaut, die bis zum ausreichenden Verstärkungsfaktor 2 verzerrungsfrei arbeiten, und es so erlauben, in jedem Falle überschwellige Intensitäten am Vibrationssystem zu erzeugen. Die Ausgangsleistung beträgt 4,5 Watt.

Weiterhin mussten für den Betrieb der Sinusgeneratoren ein stabilisiertes Netzgerät von 26 Volt Ausgangsspannung und für den Betrieb der beiden Verstärker ein stabilisiertes Netzgerät mit der Ausgangsspannung von 13 Volt nach institutsinternen Plänen erstellt werden. Sämtliche Einheiten, sowohl der Tieftongeneratoren, als auch der Verstärker und der stabilisierten Netzgeräte wurden auf Steckplatten aufgebaut. Die frequenzbestimmenden Helipot-10-Wendelpotentiometer (Beckmann), die Ausgangsübertrager, die Transformatoren und die Elektrolytkondensatoren von Kapazitäten über 2500 μ F wurden auf der Front- oder Basisplatte montiert.

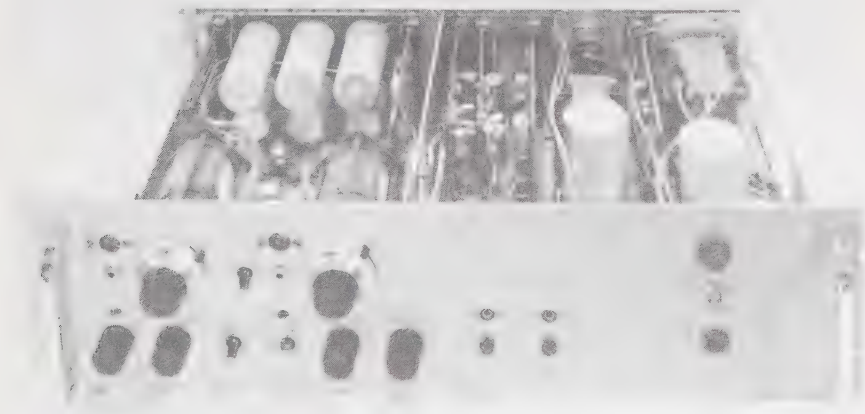


Abbildung 4. Aufgebautes Gerät mit den beiden Sinusgeneratoren.

4.2 Eichung.

Zur Eichung der drei Umschaltbereiche der Sinusgeneratoren wurden insgesamt 600 gemittelte Einzelwerte des Eichoszillographen verwendet.

In jedem Umschaltbereich wurde die Skala des Wendepotentiometers von Messung zu Messung um jeweils 5 Teilstriche weitergedreht. Der am Oscillographen gefundene Wert als Mittelwert mehrerer Ablesungen wurde auf ein Hundertstel Hz genau berechnet und in ein Diagramm eingetragen. Diese Eichmarken wurden miteinander verbunden und so die Zwischenwerte der geradzahligen Hz-Skala durch graphisches Interpolieren bestimmt.

Um die nötige Ablesegenauigkeit zu gewährleisten wurde den 10 Umdrehungen des Digitalantriebes des Helipot-Wendepotentiometers auf dem zum Ablesen bestimmten Diagramm eine Ordinate von 1000 mm Höhe zugeordnet. Die Abbildung 5 zeigt eine Darstellung dieser Eichkurven in kleinerem Maßstab.

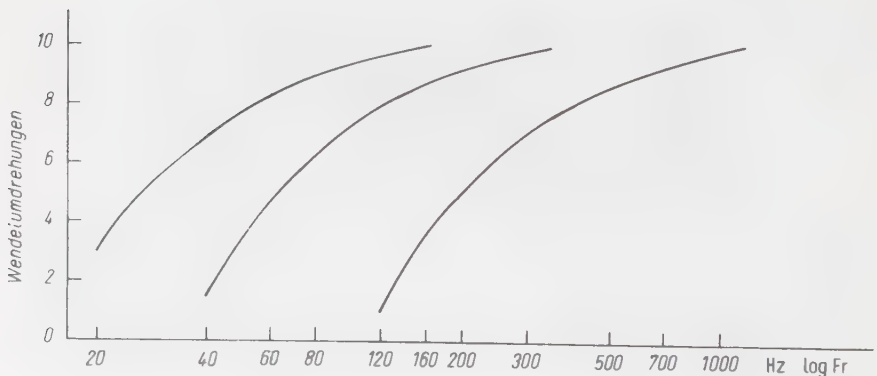


Abbildung 5. Eichkurve des Frequenzgliedes der beiden Sinusgeneratoren bei verschiedenen Umschaltbereichen.
(Kapazitäten von l. nach r: 1,0, 0,47, 0,15 µF)

5. SCHWELLENMESSUNGEN.

5.1 Schwellenmessungen am Vibrationssystem.

Um einen Vergleich des besprochenen Versuchsaufbaues mit früheren Untersuchungen zu ermöglichen wurde zunächst in einer Versuchsreihe die Schwelle mit der Fingerbeere am Lautsprecherfortsatz ohne Kopplung mit dem Cochleamodell an 5 Versuchspersonen in mehreren Meßreihen bestimmt. Der Mittelwert dieser Versuchspersonen wurde berechnet und in die Abbildung 6 eingetragen.

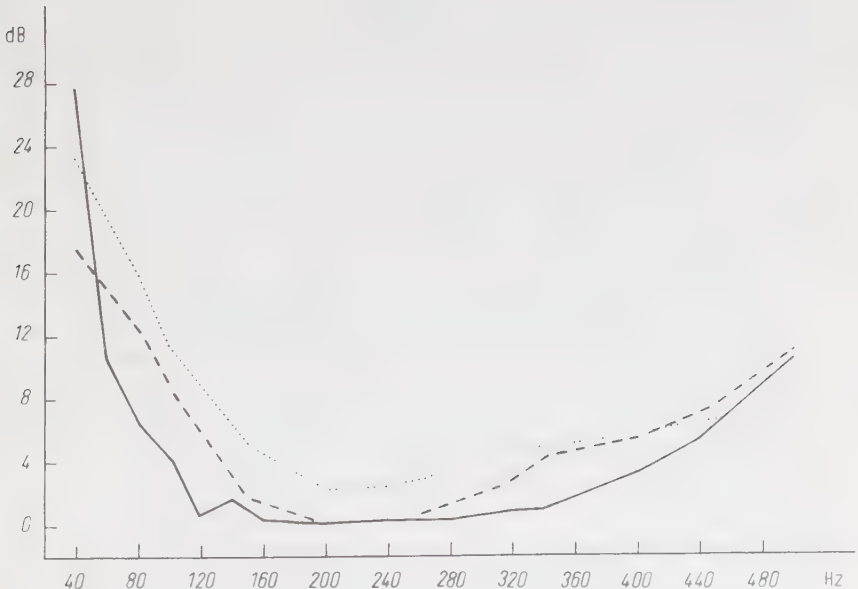


Abbildung 6. Vergleich der Intensitätsschwellenkurve der Fingerbeere am Lautsprecherfortsatz (ausgezeichnet) und der Schwellenkurve nach Hugony (gestrichelt) und Setzepfand (punktiert).

Bei diesen Messungen lag die Fingerbeere des Mittelfingers auf der abschließenden Kante des Lautsprecherfortsatzes. Bei Benutzung eines der Sinusgeneratoren wurde die Spannung am Lautsprecher und damit die mechanische Auslenkung nun kontinuierlich solange gesteigert, bis die Versuchsperson angab, daß sie die Vibration fühlen konnte. Die dann eingestellte Lautsprecherspannung wurde am Oscillographen als Messung von Spitze zu Spitze abgelesen. Der im untersuchten Frequenzbereich auftretende Minimalwert U_{Lo} (bei 200 Hz) dient als Bezugswert. Die bei den anderen Frequenzeinstellungen als Schwellenspannung angegebenen Werte U_L werden nach der Beziehung $x = 20 \log \frac{U_L}{U_{Lo}}$ umgerechnet und in Dezibel angegeben.

In Abbildung 6 sind weiterhin die Schwellenkurven von Hugony und Setzepfand zum Vergleich mit unseren Schwellenkurven eingezeichnet. Dabei wird (nach Abb. 53 aus Keidel Vibrationsreception) der Minimalwert der von Hugony angegebenen Schwellenkurve als Bezugswert benutzt. Bei der Beurteilung aller drei Schwellenkurven ergibt sich folgendes:

- a) Bei Hugony liegt die Absolutschwelle bei 200 Hz.
Der Intensitätsabfall von 40 bis 200 Hz ist 18 dB.
Von 200 bis 500 Hz steigt die Schwelle wieder langsam auf 11 dB.
- b) Bei Setzepfand liegt die Absolutschwelle bei 200 Hz. Der Intensitätsabfall von 40 bis 200 Hz ist 21 dB. Von 200 bis 500 Hz steigt die Schwelle wieder um 5 dB an.
- c) Bei unseren Messungen liegt die Absolutschwelle bei 200 Hz. Der Abfall von 40 bis 200 Hz ist 28 dB.
Von 200 bis 500 Hz steigt die Schwelle wieder langsam auf 10 dB an.

Aus obiger Kurvendiskussion ergibt sich:

1. Der Anstieg im tieferen Frequenzbereich ist steiler als im höheren Frequenzbereich. Wie von Keidel (Vib-

rationsreception Abb. 56) ausführlich gemessen wurde, ist die Anstiegssteilheit im höherfrequenten Schenkel eindeutig vom Auflagedruck der Rezeptoren abhängig. Der etwas flachere Anstieg im höheren Frequenzbereich unserer Kurve deutet darauf hin, daß das Gewicht des Fingers auf dem Lautsprecherfortsatz einen relativ geringen Auflagedruck bewirkt.

2. Die Absolutschwelle liegt bei den drei Vergleichskurven bei 200 Hz.
 3. Der Schwellenanstieg von 200 bis 500 Hz ist in allen Messungen vorhanden und von vergleichbarer Größe.
- Aus den Punkten 1 bis 3 läßt sich erkennen, daß die Schwellenkurven von Hugony und Setzepfand mit unseren Messungen gut vergleichbar sind.

5.2 Schwellenmessungen am Cochleamodell unter Benutzung der Fingerbeere.

Eine weitere Versuchsreihe dient der Bestimmung der Schwelle der Fingerbeere am angekoppelten Cochleamodell. Man geht dabei so vor: Die gewünschte Frequenz wird an einem Sinusgenerator eingestellt und mit sicher überschwelliger Intensität auf das Modell gebracht. Die Versuchsperson prüft nun durch Wandern der Fingerbeere des Mittelfingers auf der Leiste, wo sich die jeweilige Frequenz mit ihrem Maximum abbildet. Ist dieser Punkt erreicht, dann wird nach einer Pause von 1 bis 1,5 Minuten die Intensität der Vibration wieder kontinuierlich gesteigert, bis die Versuchsperson die Vibration fühlen kann.

Nach Raich (1952 in Keidel, Vibrationsreception) genügen nach einem Reiz von 3 Minuten Dauer und 35 Watt Intensität bei einer Vibrationsfrequenz von 50 Hz 150 Sekunden bis zum völligen Verschwinden der Adaptation. Da bei unseren Messungen die Zeit von 5 bis 10 Sekunden bis zum Auffinden der Schwelle nie überschritten wurde und der benutzte Lautsprecher eine Maximal-

leistung von nur 10 Watt erbringt, dürfte die Pause von 1 Minute zwischen zwei Messungen in jedem Falle ausreichend sein, um Adaptationseffekte auszuschalten.

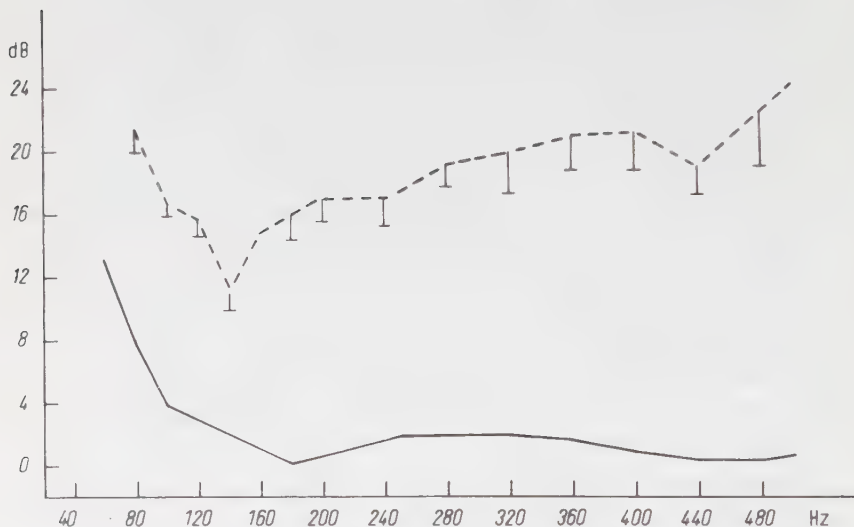


Abbildung 7. Vergleich der Schwellenkurven der Fingerbeere am Ort des Erregungsmaximums des Modells (ausgezichnet) mit derjenigen des Unterarms am Modell. (gestrichelt).

Die Abbildung 7 zeigt die Schwelle aller Versuchspersonen, gemessen an der Fingerbeere am Modell (untere Kurve). Die einzelnen Kurvenmeßwerte sind dabei so eingetragen, daß der Minimalwert bei 180 Hz als Bezugspunkt verwendet wird und sämtliche Werte in dB angegeben werden. Dabei ergibt sich folgendes:

1. Steiler Abfall im unteren Frequenzbereich, verglichen mit dem Bereich höherer Frequenzen.
2. Die Absolutschwelle liegt bei 180 Hz.
3. Der Intensitätsabfall von 60 bis 180 Hz ist 13 dB.
4. Nach dem Kurvenbild steigt die Schwelle von 180 bis 320 Hz nur um 2 dB an, um im weiteren Verlauf wieder um 2 dB abzufallen. Das bedeutet, daß der Verlauf in diesen Bereichen annähernd horizontal ist, da eine Signifikanz der Veränderungen um nur 2 dB nicht gewährleistet ist.

Da stets mit einem gleichempfindlichen Aufnehmersystem (Fingerbeere) der ganze Bereich der Membran nach der Maximalauslenkung abgesucht wird und die Schwingungen am Ort der Maximalauslenkung im Takt der Erregerfrequenz am Modelleingang erfolgen, müßte die gleiche Schwellenkurve wie bei der Messung am Lautsprecherfortsatz (Abbildung 6) gemessen werden. Der bei hohen Frequenzen (Abbildung in Nähe des angekoppelten Vibrationssystems) praktisch horizontale Verlauf der Schwelle (konstante Amplitude der Erregerspannung) und fehlende Vibrationsanstieg ist nur zu erklären durch eine mit wachsender Frequenz immer größere Vibrationsamplitude der Modelleiste bei praktisch konstanter Erregungsamplitude. Dies ist auf eine geringere Dämpfung der Energie an Orten, die näher am Ankopplungsort liegen zurückzuführen.

5.3 Schwellenmessung am Cochleamodell unter Benutzung des Unterarms.

Unmittelbar übereinstimmend mit der Ausführung aller später angeführten Messungen wird die Schwelle des Systems Unterarm-Modell gemessen. Dazu wird die Volarseite des Unterarms mit der Hand in Richtung Druckdose auf die Modelleiste gelegt. Die Intensität der Vibration bei Frequenzen von 40 bis 500 Hz wird kontinuierlich und langsam (5 bis 10 Sekunden) gesteigert, bis

die Versuchsperson Vibration fühlt.

In Abbildung 7 ist als obere Kurve die Schwelle aller Versuchspersonen am Unterarm am Modell zu sehen. Eine grobe Betrachtung ergibt:

1. Die steile Flanke liegt im unteren Frequenzbereich.
2. Die Absolutschwelle liegt bei 140 Hz.
3. Der Intensitätsabfall im niederfrequenten Bereich bis 140 Hz beträgt 11 dB.
4. Von 140 bis 500 Hz steigt die Schwelle kontinuierlich um 13 dB an. Der Knick bei 440 Hz ist nicht signifikant und wird wahrscheinlich durch geringfügige Resonanz im System hervorgerufen.

5.4 Vergleich der Schwellenmessungen.

Der Vergleich der Schwellen an der Fingerbeere am Modell und am Unterarm am Modell ergibt in den Punkten 1 bis 3 hinsichtlich der Form annähernd völlige Übereinstimmung, obwohl die Schwellenkurve des Unterarms bei erheblich höheren Werten verläuft. Dies liegt an der generell geringeren Receptorendichte des Unterarms.

Der Anstieg der Schwelle des Unterarms am Modell von 140 bis 500 Hz im Gegensatz zur Schwelle der Fingerbeere am Modell ist auf die Ortsabhängigkeit der Intensitätsschwelle zurückzuführen. Die folgende Tabelle 1 zeigt die Ortsabhängigkeit der Intensitätsschwelle an der Fingerbeere und der Volarseite des Unterarms nach Wilska 1954 (Keidel 1952).

Die Differenz Unterarm minus Fingerbeere ist für verschiedene Frequenzen im Vergleich mit unseren Meßwerten jeweils in dB der niedrigeren Vergleichsschwelle der Fingerbeere angegeben.

Wie die Tabelle 1 zeigt, ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Verhältniswerte der Schwellen von Fingerbeere am Modell und Unterarm am Modell mit den von Wilska angegebenen Werten.

Tabelle 1

Frequenz in Hz	Amplitude in 10^{-3} mm		Amplitudendifferenz in dB	
	Finger- beere	Volarseite Unterarm		
			Wilska	Eigenmessungen
50	2,0	7,6	11,6	12
100	0,6	1,8	9,6	13
200	0,07	0,39	15,0	16
400	0,05	0,72	23,3	20

5.5 Erregungsverteilung auf dem Modell.

Für alle Versuche der Schwellenmessung und der Verdeckung am Unterarm am Modell ist von entscheidender Wichtigkeit, inwieweit das von v. Bekešy inaugurierte Cochleamodell mit der Basilarmembran des menschlichen Innenohres verglichen werden kann.

Die Abbildung der verschiedenen Frequenzen auf der Basilarmembran ist streng abhängig vom Ort auf der Basilarmembran (Ranke 1950).

Um diese Gültigkeit der Ortsabhängigkeit auch für das Cochleamodell nochmals zu bestimmen wurde folgende Versuchsanordnung durchgeführt: Die Leiste des Cochleamodells wurde vom Ende der Druckdose her im Zentimetermaß unterteilt. Eine bestimmte Frequenz - im vorliegenden Falle waren es 60 Hz, 110 Hz und 320 Hz - wird über den Lautsprecher als Vibration auf die Modelleiste übertragen. Die Versuchsperson läßt nun die Fingerbeere des Mittelfingers im Abstand von jeweils 1 Zentimeter über die Leiste wandern, wobei die Schwelle in Abhängigkeit vom Ort auf der Leiste untersucht wird.

Wie aus Abbildung 8 deutlich zu ersehen ist, gilt auch für das Cochleamodell, daß verschiedene Frequenzen an genau bestimmten Orten mit ihrem Maximum zur Abbildung gelangen. (Bekešy). Außerdem zeigt sich, daß die Er-

regungsverteilung der tieffrequenten Töne flacher ist als die der höherfrequenten Töne.

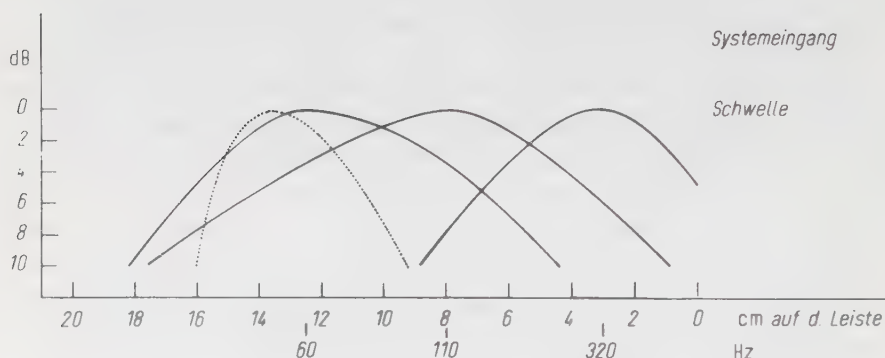


Abbildung 8. Verteilung der Vibrationsamplitude auf der Leiste des Modells bei verschiedenen Frequenzen der Vibration im Vergleich mit der Erregungsverteilung auf der Basilarmembran (punktiert) [Rank]. (Die Gesamtlänge der Modelleiste in cm entspricht dabei der Basilarmembranlänge in mm. Bezogen wird jeweils auf den Maximalwert der Verteilung (siehe Text!)).

5.6 Schwellenvergleich zwischen Ohr und Haut.

Wenn wir das menschliche Gehör und den Vibrationssinn der Haut miteinander vergleichen wollen, ist zunächst nötig, die Intensitätsschwellen der beiden Sinne in bestimmten Grenzen zu vergleichen. Wie eingangs erwähnt, unterscheiden sich die beiden Frequenzbereiche Ohr und Haut etwa um den Faktor 8. Der Frequenzbereich, den wir auf dem Cochleamodell erfassen können liegt zwischen 40 und 500 Hz. Das entspricht auf der Basilarmembran etwa Frequenzen von 320 bis 4000 Hz. Die Abbildung 9 zeigt den Vergleich der Hörschwellen-

kurve mit der Schwelle des Unterarms am Modell in diesem Bereich. Weiterhin ist ein Vergleich der Informationsverarbeitung der beiden Sinnesorgane Ohr und Haut schematisch dargestellt.

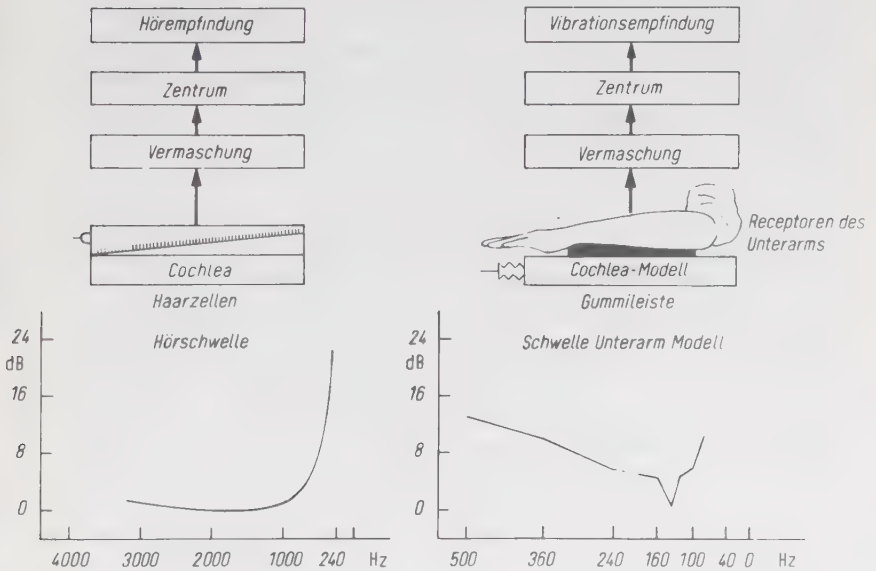


Abbildung 9. Vergleich der Schwellenkurve des Unterarms am Modell und der Hörschwelle im vergleichbaren Frequenzbereich. Schematische Darstellung der Informationsverarbeitung im Sinnesorgansystem Ohr und Haut.

Charakteristika der verschiedenen Schwellen:

1. Hörschwellenkurve.

a) Tiefste Frequenz: 320 Hz Intensität 22 dB

- b) Absolutschwelle zwischen 1 und 2 KHz.
- c) Höchste Frequenz: 4 KHz Intensität 10 dB.

2. Schwelle des Unterarms am Modell.

- a) Tiefste Frequenz: 80 Hz Intensität 10 dB
- b) Absolutschwelle bei 140 Hz
- c) Höchste Frequenz: 500 Hz Intensität 11 dB.

Vergleich der Schwellenkurven:

Bei den beiden Kurven ist der Intensitätsunterschied von tiefster Frequenz zur Absolutschwelle annähernd in derselben Größenordnung. Die Absolutschwelle liegt beim Ohr bei 1 - 2 KHz, das entspricht auf der Haut bei einem Untersetzungsverhältnis von 1 : 8 etwa 125 bis 250 Hz. Unser Wert von 140 Hz fällt also in diesen Bereich. Infolge der Ortsabhängigkeit der Intensitätsschwelle am Unterarm (siehe oben!) ergibt sich bei der Schwelle des Systems Cochleamodell plus Unterarm ebenfalls ein Schwellenanstieg bei höheren Frequenzen. Dieser Anstieg wird zwar durch die verminderte Dämpfung (siehe Schwellenmessung mit der Fingerbeere!) teilweise kompensiert, trotzdem ist dieser Schenkel der Intensitätsschwellenkurve steiler als beim Ohr. Im groben Verlauf sind beide Kurven als ähnlich zu betrachten.

6. Verdeckung einer Vibration durch eine benachbarte.

6.1 Problemstellung und Versuchsanordnung.

In dieser Versuchsreihe soll geklärt werden, ob und inwieweit zwei Vibrationen, die von Sinuserregungen hervorgerufen werden, von denen eine konstante Frequenz und Intensität (Störvibration) beibehält, die andere aber durch das Frequenzspektrum wandert (Prüfvibration) sich in ihrer gemeinsamen Schwelle beeinflussen. Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie bei den Messungen zur Bestimmung der Schwelle des Unterarms am Modell. Es werden zwei Vibrationen als Störvibrationen gewählt, von denen eine unterhalb der Frequenz der Abso-

lutschwelle, die andere darüber liegt. Diese beiden Frequenzen wurden mit 110 und 320 Hz angenommen.

Der Meßvorgang geht so vor sich, daß der Versuchsperson die Störvibration auf der Leiste des Modells überschwellig (je nach der individuellen Schwelle der Versuchspersonen zwischen 7 und 9 dB) angeboten wird.

Dann wird die Intensität der in 10-Hz-Schritten das Spektrum durchwandernden Prüfvibration jeweils solange gesteigert, bis die neu hinzukommende Vibration fühlbar wird. Dieser Versuchsablauf liegt den Abbildungen 10, 11, 12 und 13 zugrunde. Die Beschreibung dieser Kurven wird im Kapitel 6.3 vorgenommen.

6.2 Auswertung der Meßergebnisse.

Das größte Interesse bei der Auswertung der Versuchsergebnisse gilt den Punkten im Frequenzspektrum, an denen die Verdeckungskurven von den Schwellenkurven abheben. Es bieten sich folgende Möglichkeiten an, die Abhebepunkte der Verdeckungskurve festzulegen:

- a) Direkte Berührungspunkte der Schwellenkurve mit der Verdeckungskurve, soweit diese vorhanden sind.
- b) Bestimmung der $M - 3\tilde{\sigma}$ -Grenze, gegeben durch die Differenz zwischen Mittelwert und Standardabweichung zwischen Schwellenkurve und Verdeckungskurve. Bei den Frequenzen, an denen die Signifikanzbreite in den Bereich der Schwelle eintaucht, ist ein Unterschied zwischen Schwelle und Verdeckung nicht mehr gewährleistet. Also entspricht dieser Punkt in Annäherung dem Abhebepunkt.
- c) Parallelverschiebung der individuellen Schwellenkurve zur Ordinate bis zu dem Punkt, an dem die Schwellenkurve und die höher- und tieferfrequenten Anteile der Verdeckungskurve etwa zur Deckung kommen. Verläßt die Verdeckungskurve diesen Bereich, so ist unser Abhebepunkt erreicht. Dieser Auswertungsmodus muß notgedrungen bei Zuständigkeit von 6.2 a), also bei di-

rekter Berührung von Schwellenkurve und Verdeckungskurve entfallen.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die mit diesen Methoden bestimmten Verdeckungsbreiten des nieder- und höherfrequenten Schenkels in Hz und in Prozent der Abweichung von der Störvibration angegeben. Beim Vergleich der Verdeckungsbreiten der beiden Versuchspersonen in Prozent der Störvibration ergibt sich, daß alle angegebenen Methoden zur Bestimmung der Abhebe- punkte zu annähernd gleichen Ergebnissen führen.

Tabelle 2

Störvibration: 110 Hz

Vp	Auswertung	Untere Grenze in			Obere Grenze in		
		Hz	Δf_u	%	Hz	Δf_o	%
Gleichsner	a	-	-	-	-	-	-
Gleichsner	b	90	20	18	220	110	100
Gleichsner	c	90	20	18	250	140	128
Mittelwert Gleichsner:	a+b+c	90	20	18	235	125	114
Bönnwald	a	80	30	27	470	360	327
Bönnwald	b	100	10	9	400	290	264
Bönnwald	c	-	-	-	-	-	-
Mittelwert Bönnwald:	a+b+c	90	20	18	435	325	295

Mittelwerte beider Versuchspersonen zusammen:

Untere Grenze in Hz : 90

Untere Grenze in % : 18

Untere Grenze als Δf_u : 20

Obere Grenze in Hz : 335

Obere Grenze in % : 204,5

Obere Grenze als Δf_o : 225

Tabelle 3

Störvibration: 320 Hz

Vp	Auswertung	Untere Grenze in			Obere Grenze in		
		Hz	Δf_u	%	Hz	Δf_o	%
Gleichsner	a	-	-	-	-	-	-
Gleichsner	b	220	100	31	420	100	31
Gleichsner	c	140	180	56	450	130	40
Gleichsner							
Mittelwert:	a+b+c	180	140	43,5	435	115	35,5
Böhnwald	a	60	260	81	450	130	40
Böhnwald	b	90	230	72	420	100	31
Böhnwald	c	-	-	-	-	-	-
Böhnwald							
Mittelwert:	a+b+c	75	245	76,5	435	115	35,5

Mittelwerte beider Versuchspersonen zusammen:
(Störvibration 320 Hz)

Untere Grenze in Hz : 127,5

Untere Grenze in % : 60

Untere Grenze als Δf_u : 192

Obere Grenze in Hz : 435

Obere Grenze in % : 35,5

Obere Grenze als Δf_o : 115

6.3 Beschreibung der Versuchsergebnisse bei Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch eine benachbarte andere.

a) Störvibration 110 Hz

Abbildung 10 und 12 zeigen beide im niederfrequenten Schenkel bis zu 90 Hz entweder Berührung der Verdeckungskurve mit der Schwellenkurve oder parallelen Verlauf beider Kurven. In der Nähe der Störvibration erfolgt ein deutliches Abheben der Mitfühl-

schwelle von der individuellen Intensitätsschwelle. In diesem Bereich treten auch schwebungsähnliche Verzerrungen der Verdeckungskurve von 3 bis 7 dB Intensität auf. Bei 235 Hz bei Vp Gl. bzw. bei 435 Hz bei Vp 18. haben sich die Mitfühlschwellenkurve und die Intensitätsschwellenkurve wieder bis zur Berührung oder zu parallelem Verlauf genähert.

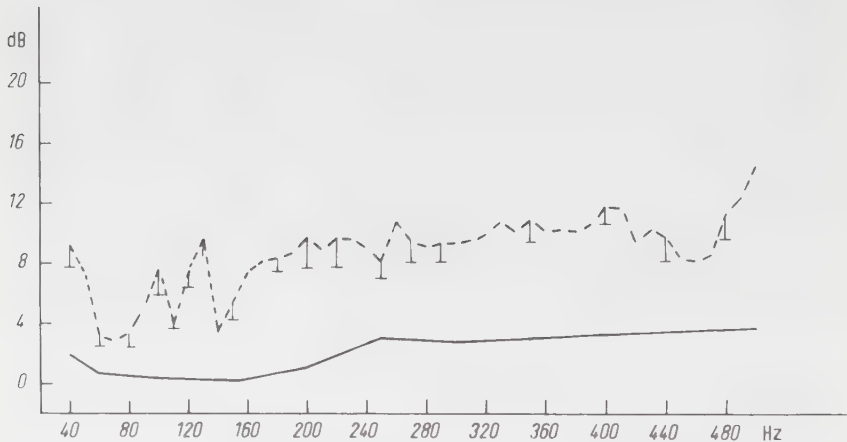


Abbildung 10. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezeichnet) und Verdeckungsschwellenkurve (gestrichelt) bei einer Störvibration von 110 Hz. Versuchsperson: Gl.

Bei Vp Gl. ist die Verdeckungsbreite nach dem niederfrequenten Schenkel zu im Mittel 18% der Störvibrationsfrequenz, bei Vp B8. ebenfalls 18%.

Die Breite der Verdeckung im höherfrequenten Schenkel ist bei Vp Gl. im Mittel 114% der Störvibrationsfrequenz, bei Vp B8. 295% (Tabelle 2).

Wie die Breiten der Verdeckung nach beiden Seiten

der Störvibration bei beiden Versuchspersonen zeigen, ist eine eindeutige Aussage darüber möglich, daß Verdeckung auftritt und daß die Verdeckungsbreite im niederfrequenten Schenkel gleich groß ist.

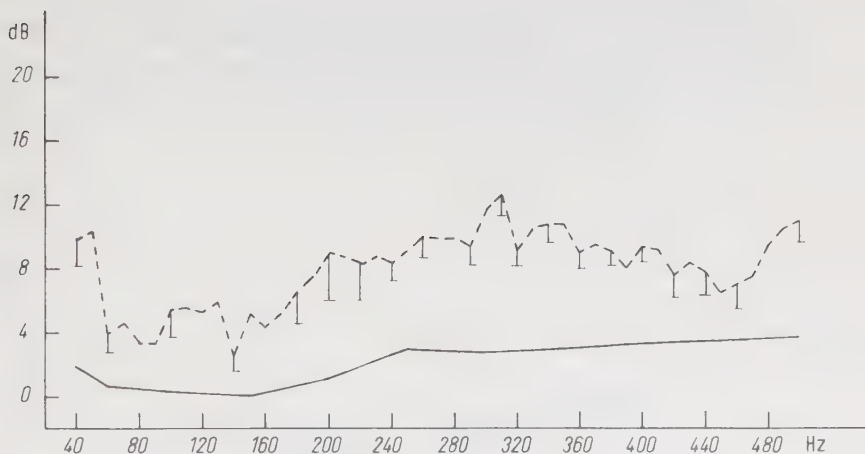


Abbildung 11. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezeichnet) und Verdeckungsschwellenkurve (gestrichelt) bei einer Störvibration von 320 Hz. Versuchsperson: G1.

Der große Unterschied der Breite der Verdeckung bei beiden Versuchspersonen im höherfrequenten Schenkel ist darauf zurückzuführen, daß die Störvibration mit einer konstanten Lautsprecherspannung von 500 mV bei Vp G1 7,1 dB über der individuellen Schwelle, bei Vp BÖ. jedoch bereits 8,9 dB über der Individualschwelle liegt.

Beim Gehör treten ab einer bestimmten Intensität des Störtones ebenfalls sehr große Änderungen der Verdeckungsbreite im höherfrequenten Schenkel auf (Zwicker). Also handelt es sich bei dem vorliegenden Be-

fund um eine Parallelität zwischen Gehör und Vibrationssinn.

Als Mittelwert von beiden Versuchspersonen zusammen ergibt sich bei einer Störvibrationsfrequenz von 110 Hz eine Verdeckungsbreite von $\Delta f_u = 20$ Hz nach dem niederfrequenten und von $\Delta f_o = 225$ Hz nach dem höherfrequenten Schenkel zu. Das entspricht einem Verhältnis von 1 : 11,2 und weist auf einen sehr unsymmetrischen Verlauf der Mitfühlschwellenkurve hin.

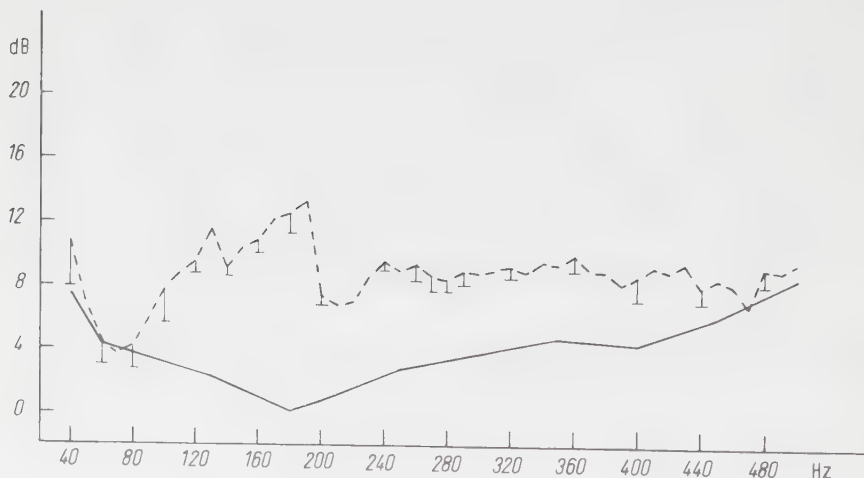


Abbildung 12. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezogen) und Verdeckungsschwellenkurve (gestrichelt) bei einer Störvibration von 110 Hz. Versuchsperson: B6.

b) Störvibration 320 Hz.

Abbildung 11 und 13 zeigen beide im niederfrequenten Anteil bis in den Bereich von 180 Hz bei Vp G1. und 75 Hz bei Vp B6. entweder Berührung der Verdeckungs-

kurve mit der Schwellenkurve oder parallelen Verlauf beider Kurven. In der Nähe der Störvibration erfolgt ein deutliches Abheben der Mitfühlschwelle von der individuellen Intensitätsschwelle. In diesem Bereich treten auch schwebungsähnliche Verzerrungen der Verdeckungskurve von 3 bis 4 dB Intensität auf. Bei 435 Hz haben sich bei beiden Versuchspersonen die Mitfühlschwellenkurve und die Intensitätsschwellenkurve wieder bis zur Berührung oder zu parallelem Verlauf genähert.

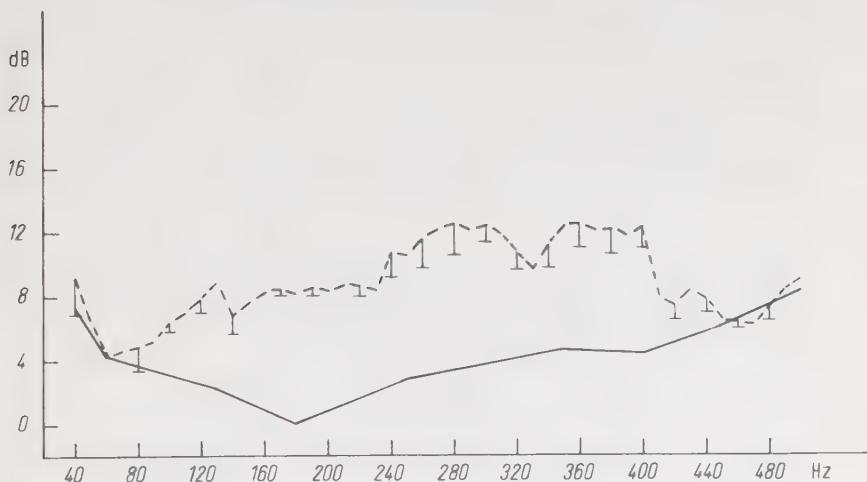


Abbildung 13. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezeichnet) und Verdeckungsschwellenkurve (gestrichelt) bei einer Störvibration von 320 Hz. Versuchsperson: BÖ.

Bei Vp Gl. ist die Verdeckungsbreite nach dem niederfrequenten Schenkel zu im Mittel 43,5% der Störvibrationsfrequenz, bei Vp BÖ. 76,5%.

Die Breite der Verdeckung im höherfrequenten Schen-

kel ist bei Vp Gl. ebenso wie bei Vp B6. 35,5%. Wie die Breiten der Verdeckung nach beiden Seiten der Störvibration bei beiden Versuchspersonen zeigen, ist eine eindeutige Aussage darüber möglich, daß Verdeckung auftritt und daß die Verdeckungsbreite im höherfrequenten Schenkel gleich groß ist. Der in diesem Falle nicht allzu große Unterschied der Verdeckung bei beiden Versuchspersonen im niederfrequenten Schenkel muß auch hier wieder auf die höhere Intensität der Störvibration, bezogen auf die individuelle Intensitätsschwelle bei Vp B6. zurückgeführt werden.

Beim Gehör tritt dieser Effekt der breiteren Verdeckung zum niederfrequenten Anteil des Frequenzspektrums bei höherer Frequenz des Störtones in Abhängigkeit von der Intensität des Störtones auch auf, jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß. Im Prinzip handelt es sich also auch hier beim Gehör und beim Vibrationssinn der Haut um ähnliche Erscheinungen, nur mit dem quantitativen Unterschied, daß beim Vibrationssinn der Verdeckungseffekt auch zum tiefen Frequenzbereich hin erheblich deutlicher zutage tritt. Als Mittelwert von beiden Versuchspersonen zusammen ergibt sich bei einer Störvibrationsfrequenz von 320 Hz eine Verdeckungsbreite von $\Delta f_u = 192$ Hz nach dem niederfrequenten und von $\Delta f_o = 115$ Hz nach dem höherfrequenten Schenkel zu. Das entspricht einem Verhältnis von 1 : 0,6 und weist auf die überwiegende Verdeckung zum niederfrequenten Schenkel zu hin. Es zeigt sich also, daß das Verhältnis der Verdeckungsbreite von verdecktem niederfrequentem zu verdecktem höherfrequentem Schenkel sehr wesentlich von der Lage der Störvibration im Frequenzspektrum abhängig ist.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei tiefen Frequenzen der Störvibration (110 Hz) die Verdeckung

zum höherfrequenten Schenkel hin stark überwiegt, wie das Verdeckungsverhältnis von 1 : 11,2 zeigt, und daß bei höheren Frequenzen der Störvibration (320 Hz) die Verdeckung zum niederfrequenten Schenkel hin, wenn auch wesentlich geringfügiger, überwiegt, wie das Verdeckungsverhältnis von 1 : 0,6 zeigt.

Bei den beiden anderen, hier nicht berücksichtigten Versuchspersonen ergaben sich Meßwerte, die von den hier beschriebenen kaum abweichen.

Zur Bestimmung der Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch eine andere wurden an 4 Versuchspersonen insgesamt 3041 Einzelmessungen durchgeführt.

7. Verdeckung einer sinusförmigen Vibration auf dem Cochlea-modell durch eine Vibration, die durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz erzeugt wird.

7.1 Problemstellung und Versuchsanordnung.

In dieser Versuchsreihe soll geklärt werden, ob und inwieweit Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration eine durch das Frequenzspektrum von 40 bis 500 Hz wandernde Prüfvibration zu verdecken vermag. Der Versuchsaufbau bleibt der gleiche, wie bei der Messung der Schwelle des Unterarms am Modell.

Das verwendete Schmalbandrauschen wurde mit einer Bandgeschwindigkeit von 19 cm/sec, einer Mittenfrequenz von 1000 Hz und einer Bandbreite von 980 bis 1020 Hz am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart⁺ hergestellt. Durch Abspielen des Bandes mit einer Geschwindigkeit von 4,75 cm/sec konnten wir das Schmalbandrauschen 1 : 4 untersetzen und kamen so auf die erforderliche Mittenfrequenz von 250 Hz mit

⁺An dieser Stelle dürfen wir hierfür verbindlichst danken!

einer Bandbreite von 245 bis 255 Hz. Dieses Schmalbandrauschen wird mit überschwelliger Intensität auf der Leiste des Modells zur Reception gebracht. Daraufhin wird die Intensität der wandernden Prüf vibration solange gesteigert, bis die dadurch ausgelöste Vibration aus der Empfindung des Schmalbandrauschens auftaucht.

7.2 Auswertung der Versuchsergebnisse.

Das größte Interesse bei der Auswertung der Versuchsergebnisse gilt auch hier wieder den Punkten im Frequenzspektrum, an denen die Verdeckungskurven von den individuellen Schwellenkurven abheben.

Die Tabelle 4 enthält die Werte für die Verdeckungsgebiete, die gemäß den Methoden a) bis c) bestimmt werden (Siehe 6.2!).

Wie ein Vergleich der Verdeckungsweiten zeigt, führen alle drei Methoden zu annähernd gleichen Ergebnissen.

Tabelle 4

Stör vibration: Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz
250 Hz und der Bandbreite 245 - 255 Hz.

Methode	Auswertung	Untere Grenze in			Obere Grenze in		
		Hz	Δf_u		Hz	Δf_o	%
Gleichsner	a	-	-	-	-	-	-
Gleichsner	b	110	110	44	400	150	60
Gleichsner	c	110	110	44	400	150	60
Mittelwert	a+b+c	110	110	44	400	150	60
Gleichsner	d	50	50	50	410	160	64
Gleichsner	b	50	100	64	400	150	60
Gleichsner	c	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	a+b+c	70	150	70	405	155	62

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Vp	Auswertung	Untere Grenze in			Obere Grenze in		
		Hz	Δf_u	%	Hz	Δf_o	%
Roth	a	-	-	-	-	-	-
Roth	b	110	140	56	420	170	68
Roth	c	70	180	72	460	210	84
Mittelwert:	a+b+c	90	160	64	440	190	76

Mittelwerte aller drei Versuchspersonen zusammen:

Untere Grenze in Hz : 102

Untere Grenze in % : 59,3

Untere Grenze als Δf_u : 148

Obere Grenze in Hz : 415

Obere Grenze in % : 66

Obere Grenze als Δf_o : 165

7.3 Beschreibung der Versuchsergebnisse bei Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration.

a) Versuchsperson Gleichsner. Abbildung 14.

Im niederfrequenten Anteil des Spektrums verläuft die Verdeckungskurve bis 145 Hz parallel der individuellen Schwellenkurve. Daraufhin hebt die Mitfühlschwelle ab, erreicht zwischen 260 und 370 Hz ihren Gipfel und kehrt dann bei 400 Hz wieder in den Bereich der Parallelität mit der Schwellenkurve zurück. Schwebungen in der Umgebung der Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens sind hier bei Verwendung von Schmalbandrauschen kaum zu erkennen.

Die Verdeckung, berechnet in Prozent der Mittenfrequenz, ist bei Vp Gl. im Mittel 42% zum nieder- und 60% zum höherfrequenten Anteil des Spektrums. Das entspricht den Δf -Werten von 105 bzw. 150 Hz.

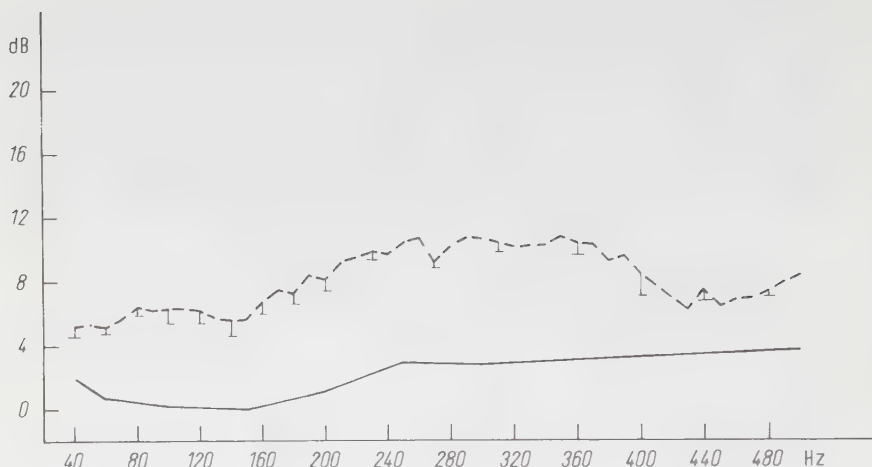
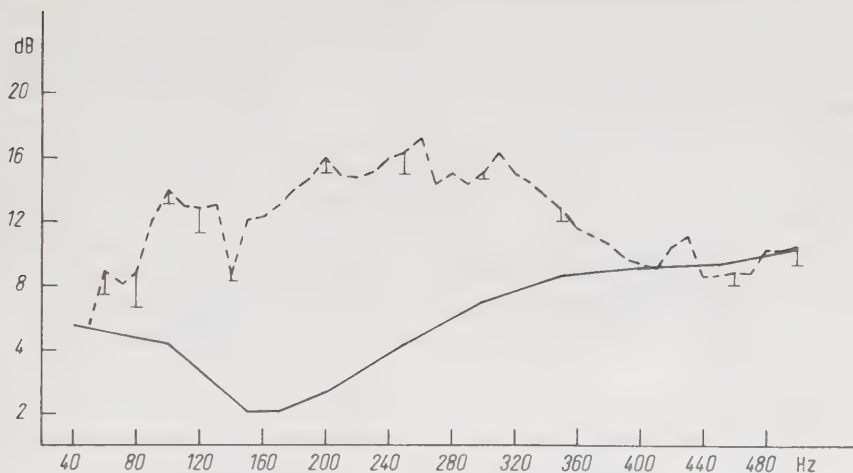


Abbildung 14. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezeichnet) und Verdeckungsschwellenkurve bei einem Schmalbandrauschen von 250 Hz Mittenfrequenz als Störvibration (gestrichelt). Vp Gl.

b) Versuchsperson Rosenbauer. Abbildung 15

Im niederfrequenten Anteil des Spektrums verläuft die Verdeckungskurve bis 70 Hz parallel der individuellen Schwellenkurve. Daraufhin hebt die Mitfühlschwelle ab, erreicht zwischen 150 und 310 Hz ihren Gipfel und kehrt dann bei 405 Hz wieder in den Bereich der Berührung mit der Schwellenkurve zurück. Schwebungsähnliche Verzerrungen im Bereich der Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens bewegen sich in der Größenordnung von 1 bis 2,5 dB.

Die Verdeckung, berechnet in Prozent der Mittenfrequenz, ist bei Vp Ro. im Mittel 72% zum nieder- und 62% zum höherfrequenten Anteil des Spektrums. Das entspricht den Δf -Werten von 180 bzw. 155 Hz.



Abbildungung 15. Schwellenkurve des Unterarms am Modell (ausgezeichnet) und Verdeckungsschwellenkurve bei Schmalbandrauschen mit der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration (gestrichelt) Vp Ros.

c) Versuchsperson Roth. Abbildung 16.

Im niederfrequenten Anteil des Spektrums verläuft die Verdeckungskurve bis 90 Hz parallel der individuellen Schwellenkurve. Daraufhin hebt die Mitfühlschwelle ab, erreicht zwischen 260 und 290 Hz ihren Gipfel und kehrt dann bei 440 Hz wieder in den Bereich der Parallelität mit der Schwellenkurve zurück. Schwebungsähnliche Verzerrungen im Bereich der Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens bewegen sich in der Größenordnung bis 1 dB.

Die Verdeckung, berechnet in Prozent der Mittenfrequenz, ist bei Vp Roth im Mittel 64% zum nieder- und 76% zum höherfrequenten Anteil des Spektrums.

das entspricht Δf -Werten von 160 bzw. 190 Hz.

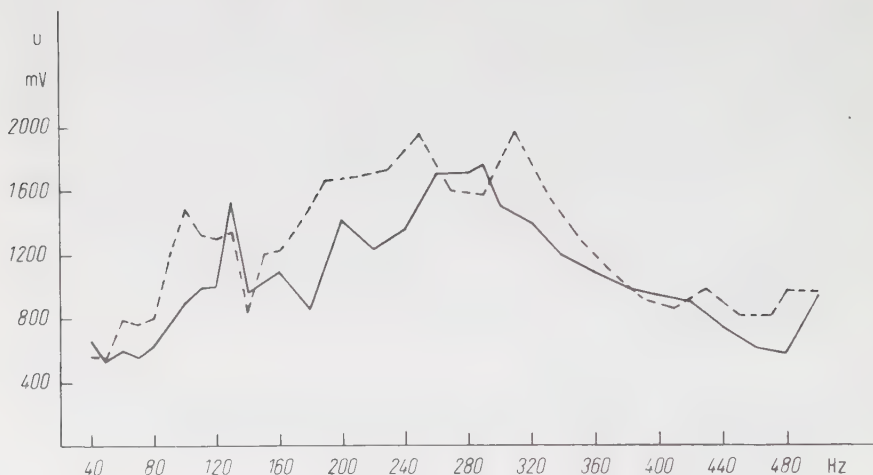


Abbildung 16. Vergleich der Verdeckung von Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration bei zwei Versuchspersonen. Ordinate: Lautsprecher-spannung. Vp Roth (ausgezeichnet) Vp Ros. (gestrichelt).

Bei den drei Versuchspersonen dieser Versuchsreihe zeigt sich eindeutig, daß eine sinusförmige Vibration von Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz als Vibration verdeckt wird. Mit Verdeckungsbreiten von 42%, 72% und 64% im tieferen Anteil des Frequenzspektrums zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse.

Als Mittelwert der drei Versuchspersonen ergibt sich bei Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz von 250 Hz und der Bandbreite von 245 bis 255 Hz eine Verdeckungsbreite von 59% im tieferliegenden Frequenzbereich, das

entspricht einem Δf_u von 148 Hz und eine Verdeckungs-
breite von 66% im höheren Frequenzbereich, das ent-
spricht einem Δf_o von 165 Hz.

Das Verhältnis der Verdeckung von tieferem zu höherem
verdecktem Frequenzanteil ergibt sich demnach als 1:0,9
was auf einen recht symmetrischen Verlauf der Verdeck-
ungskurve hinweist.

8. Vergleich der Verdeckung von Sinustönen durch Sinus-
töne oder Schmalbandrauschen am Ohr und der Verdeckung
von sinusförmigen Vibrationen durch sinusförmige Vibra-
tionen oder Schmalbandrauschen als Vibration auf der
Haut des Unterarms am Modell.

- 8.1.a) Verdeckung eines Prüftones durch einen benachbarten
Störton.

Am menschlichen Gehör konnte festgestellt werden, daß
das Verhältnis der Verdeckungsbreite von verdecktem
niederfrequentem Schenkel zu verdecktem höherfrequen-
tem Schenkel einen bestimmten Zahlenwert hat, dessen
Größe von der Lage des Störtones innerhalb des Fre-
quenzspektrums und dessen Intensität abhängig ist.
Wie aus den graphischen Darstellungen von Zwicker zu
entnehmen ist, gelten für das Ohr folgende Verhältnis-
werte (Nähere Erläuterung siehe unten!):

Störtonfrequenz	$\frac{f_o}{f_u}$ -- bei Intensität Störton	
	70 dB	90 dB
200 Hz	1 : 7,5	1 : 54
1000 Hz	1 : 10	1 : 22
4000 Hz	1 : 6	1 : 8

- b) Verdeckung einer sinusförmigen Prüf vibration durch
eine benachbarte Stör vibration.

Auch bei der Verdeckung einer Vibration durch eine
benachbarte andere am Unterarm am Modell zeigt sich

eine Verdeckungsbreite nach beiden Seiten der Störvibration, deren nieder- und höherfrequenter Bereich in einem bestimmten Verhältnis f_u/f_o steht und deren zahlenmäßige Größe ebenfalls abhängig ist von der Lage der Störvibration im Frequenzspektrum (Abbildung 10 bis 13) und ihrer Intensität (Vergleich der Verdeckungsbreiten bei Vp Gl. und Vp Bö.). Bei einer durchschnittlichen Intensität der Störvibration von 8 dB über der Individualschwelle ergaben sich als Mittel der beiden Versuchspersonen Gl. und Bö. folgende Verhältniswerte:

Störvibrationsfrequenz	$\frac{f_u}{f_o}$ --- bei Störvibrationsintensität 8 dB
110 Hz	1 : 11,2
320 Hz	1 : 0,6

Es wird also sowohl bei Verdeckungsmessungen am menschlichen Gehör, wie an dem System Unterarm plus Cochlea-modell, das Verhältnis von verdecktem niederfrequentem zu verdecktem höherfrequentem Schenkel der Verdeckungskurve bei Verdeckung eines Sinustones durch einen anderen oder einer sinusförmigen Vibration durch eine andere von tiefen zu höheren Frequenzen der Störtöne, bzw Störvibrationen kleiner.

8.2.a) Verdeckung eines Sinustones durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz.

Die Verdeckung eines Sinustones durch Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 1000 Hz und der Intensität 40 dB über der Hörschwelle ergibt beim Ohr ein Verdeckungsverhältnis von 1 : 5 von nieder- zu höherfrequentem Anteil und bei einer Intensität von 60 dB ein Verhältnis von 1 : 9.

Die Absolutwerte $f_u + f_o$ der Verdeckungsbreiten ergeben nach den graphischen Darstellungen bei Zwicker wesentlich größere Werte als bei Verdeckung von Sinustönen untereinander. Als Beispiel seien folgende Werte angegeben:

Störfrequenz	Intensität	Verdeckungsbreite $f_u + f_o$
1000 Hz Sinuston	70 dB	4500 Hz
1000 Hz Mittenfrequenz Schmalbandrauschen	60 dB	7200 Hz

Weiterhin (Zwicker) ist die Verdeckung durch Schmalbandrauschen wesentlich symmetrischer als die durch Sinustöne.

Schwebungsähnliche Verzerrungen des Kurvenverlaufes treten beim Gehör bei Verwendung von Schmalbandrauschen kaum auf.

- b) Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch Schmalbandrauschen bestimmter Mittenfrequenz als Störvibration.

Auf der Haut des Unterarms am Modell ist die Gesamtverdeckung $f_u + f_o$ bei einer Störvibration von 110 Hz etwa 245 Hz breit. (Streubreite: $\bar{\sigma} = 61$ Hz). Einer Störvibration von 320 Hz kommt die Verdeckungsbreite von 307 Hz (Streubreite: $\bar{\sigma} = 23$ Hz) zu. Demnach müsste die Verdeckungsbreite einer sinusförmigen Vibration von 250 Hz Störton bei linearer Interpolation etwa bei 286 Hz liegen. Für die vorliegenden Messungen mit Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 250 Hz als Vibration ergibt sich jedoch eine Gesamtverdeckung $f_u + f_o$ von 313 Hz (Streubreite: $\bar{\sigma} = 23$ Hz).

Die Verhältnisse liegen also ähnlich wie beim Gehör, d.h. Schmalbandrauschen verdeckt breiter als eine si-

nusförmige Störvibration identischer Intensität. Weiterhin zeigt sich, daß auch, wie beim Ohr, auf der Haut des Unterarms am Cochleamodell Schmalbandrauschen symmetrischer verdeckt als sinusförmige Vibration. Das zeigt das Verdeckungsverhältnis von 1:0,9. Auch schwebungsähnliche Verzerrungen der Verdeckungskurve treten in Analogie zum Gehör mit Maximalwerten bis 2,5 dB geringer auf als bei Verdeckung mit sinusförmigen Vibrationen mit Verzerrungen von 3 bis 7 dB.

Abbildung 17 zeigt den Vergleich der Verdeckung eines Sinustones durch Schmalbandrauschen mit der Verdeckung einer sinusförmigen Vibration durch Schmalbandrauschen als Vibration bei je zwei Versuchspersonen. Um vergleichbare Frequenzbereiche zu finden wurde der bereits oben beschriebene Faktor 8 in dieses Diagramm so einbezogen, daß einer bestimmten Frequenz der Hautmessungen der jeweils 8-fache Frequenzwert am Ohr zugeordnet wurde. Um eine gemeinsame Ausgangsbasis zu erhalten wurde der Auftragsmodus der Intensität der Verdeckungskurven so gewählt, daß sie jeweils auf die Individualschwelle bezogen wurden. Wie aus Abbildung 17 zu ersehen ist, liegt beim Ohr die Verdeckungsschwelle bei verschiedenen Versuchspersonen unterschiedlich hoch über der Individualschwelle, während die Breite der Verdeckung annähernd identisch ist. Bei der Verdeckungsmessung auf der Haut des Unterarmes am Modell mit Schmalbandrauschen zeigt sich ebenfalls, daß die Höhe der Verdeckungsschwelle bei den einzelnen Versuchspersonen stark differiert, daß aber, wieder in Analogie zum Gehör, die Verdeckungsbreiten annähernd identisch sind.

Die gesamte Breite der Verdeckung im vergleichbaren Frequenzbereich ist bei der Haut des Unterarms am Modell erheblich breiter als beim Ohr.

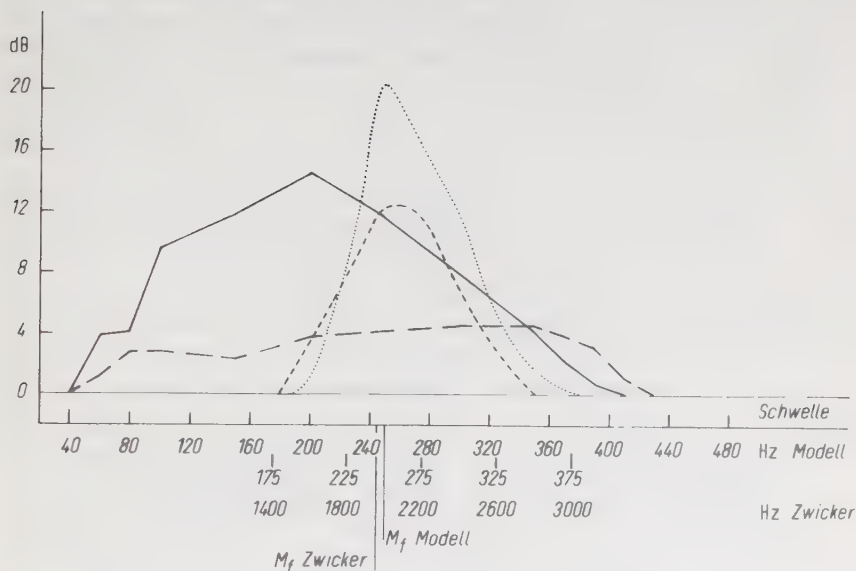


Abbildung 17. Vergleich der Verdeckung von Schalltönen an Ohr und Haut im vergleichbaren Frequenzbereich. Messungen am Ohr (Zwicker): Beobachter G (punktiert), Beobachter Z (kurz gestrichelt). Messungen an der Haut des Unterarms am Modell: Versuchsperson Gl. (lang gestrichelt), Versuchsperson Ros. (ausgezeichnet). Alle Kurven sind auf die individuelle Schwelle bezogen.

Auch die Abbildung 18 zeigt, daß die Breite der Verdeckung an der Haut wesentlich größer ist als beim Ohr. Während nämlich beim Gehör Störöne bis annähernd 70 dB die Schwelle im vergleichbaren Frequenzbereich wieder erreichen, ist das beim Vibrationssinn nicht mehr der Fall. Wie eingangs bereits erwähnt wurde ist der Intensitätsbereich

der beiden Sinne ja sehr unterschiedlich. Deutlich erkennbar ist jedoch in der Abbildung 18 die Tendenz der Verdeckungskurven auf der Haut, auch bei höheren Intensitäten der Störvibration, in den Extrembereichen des Frequenzspektrums die Schwelle wieder zu erreichen.

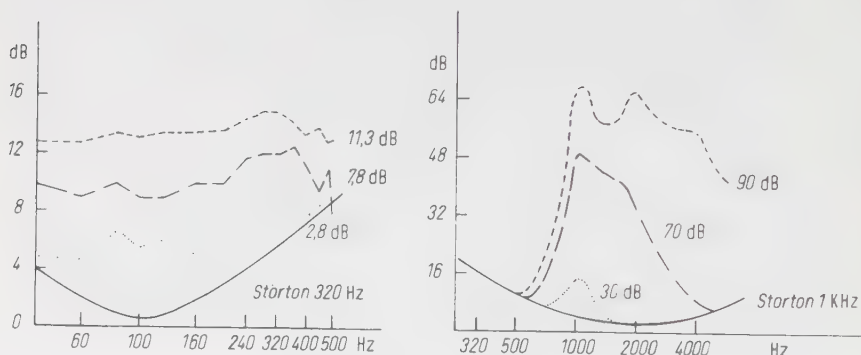


Abbildung 18. Vergleich der Mitfühlschwellen des Unterarms am Modell (Vp W.) und des Gehörs bei steigenden Intensitäten der Störimpulse durch Schmalbandrauschen. Störvibration auf der Haut: 320 Hz Störton am Ohr: 1000 Hz.

9. Diskussion.

Obwohl sich die Haut hinsichtlich der Verdeckung zweier Vibrationen ähnlich verhält wie das Gehör, muß hier bei dem System Haut des Unterarms plus Cochleamodell der entscheidend vergrößerte Verdeckungsbereich als besonderes Ergebnis der vorliegenden Arbeit hervorgehoben werden. Dies geht besonders deutlich aus Abbildung 17 hervor. Diese Abbildung enthält, wie bereits beschrieben, zwei charak-

teristische Verdeckungskurven einer Schmalbandvibration durch eine sinusförmige Vibration unterschiedlicher Frequenz. Zusätzlich sind noch im Maßstab 1:8 verkleinert Meßergebnisse am Gehör zweier Versuchspersonen bei Verdeckung eines Sinustones variabler Frequenz durch Schmalbandrauschen (Zwicker) mit eingezeichnet. Sämtliche Verdeckungskurven erreichen die Schwelle bei einer bestimmten, von der Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens deutlich entfernten Frequenz. Außerhalb dieser Frequenz wird also bei gleichbleibender Intensität der Störimpulse keine Verdeckung mehr auftreten. Es zeigt sich nun, daß der Bereich auf dem System Haut am Unterarm plus Cochleamodell praktisch den ganzen verfügbaren Frequenzbereich überstreicht, während beim Gehör doch ein relativ schmaler Bereich der Schwellenkurve der Verdeckung anheimfällt.

Diese breite Verdeckungskurve bei dem System Unterarm plus Cochleamodell muß im wesentlichen darauf zurückgeführt werden, daß die durch Dispersion hervorgerufene Erregungsverteilung beim Modell größer ist als auf der Basilarmembran des Innenohres. Dies geht bereits aus Abbildung 8 hervor, wo die Verteilung der Erregung auf dem Modell mit der Erregungsverteilung auf der Basilarmembran verglichen wird. Auch hier ist etwa der Faktor 3 als Unterschied der Breite der Erregungsverteilung abschätzbar.

Diese etwa um den Faktor 3 vergrößerte Verdeckungsbreite bei dem an der Haut untersuchten System läßt vermuten, daß eine Frequenzgruppe, wie sie beim Ohr gemessen worden ist (Feldtkeller und Zwicker) hier bei der Haut nicht festzustellen sein wird.

Die Frequenzgruppe ist dabei ein Frequenzbereich, innerhalb dessen 2 oder mehrere Sinustöne hinsichtlich ihrer Intensität bewertet, zusammengefaßt zur Lautheitsempfindung beitragen. Sie wird von Feldtkeller und Zwicker unter anderem so gemessen, daß ein schmalbandiges Rauschen durch zwei Sinustöne, deren Frequenz symmetrisch zur

Mittenfrequenz des Rauschens liegt, verdeckt wird. Dabei wird der Frequenzabstand der Sinustöne verändert. Es ergibt sich eine charakteristische Mithörschwelle, deren Verlauf horizontal ist, solange die beiden Sinustöne sich innerhalb der Frequenzgruppe bewegen. Erst wenn die beiden Sinustöne außerhalb der Frequenzgruppe (die Mittenfrequenz des Rauschens liegt dabei in der Mitte dieses charakteristischen Frequenzbereiches) liegen fällt die Mithörschwelle nach einem Knick sehr steil ab.

Die Frequenzgruppe ist über den ganzen Hörbereich bei jeder Mittenfrequenz meßbar und hat etwa die Breite einer Terz. Aus Untersuchungen von Feldtkeller und Zwicker geht hervor, daß man ganz grob die Breite der Frequenzgruppe gleich der halben Breite des hoch- oder niederfrequenten Schenkels der Verdeckungskurve setzen kann.

Auf das System Haut des Unterarms plus Cochleamodell bezogen bedeutet dies, daß aufgrund unserer Meßergebnisse die Frequenzgruppe mindestens eine Oktave betragen müsste. Dies könnte mit der geringen Belegungsdichte der Rezeptoren eventuell in Übereinstimmung gebracht werden, wäre jedoch vom Standpunkt der Informationsverarbeitung gesehen ein doch etwas größer Integrationsbereich für den Aufbau der entsprechenden Vibrationsempfindung bei einer bestimmten Reizintensität.

Wir haben vergleichbare Messungen zu den Untersuchungen von Feldtkeller und Zwicker hinsichtlich der Frequenzgruppe auch an unserem Modellsystem vorgenommen, waren jedoch nicht in der Lage, auch nur annähernd ähnliche Verdeckungskurven zu erhalten, wie sie bei der Verdeckung einer Schmalbandvibration durch eine sinusförmige Vibration meßbar waren. Die gemessenen Kurven sind praktisch im ganzen Bereich horizontal zur Schwelle verlaufend. Es ergeben sich bei den Versuchspersonen außerordentliche Schwierigkeiten, diese konstanten Dauererregungen, verursacht durch drei Signale, hinsichtlich eines Unterschiedes zu diskriminieren. Hier dürfte

wohl als Ursache die außerordentlich starke Adaptation des taktilen Systems wie auch die geringe Speicherzeit des taktilen Gedächtnisses eine ursächliche Rolle spielen.

Wir müssen deshalb abschließend aufgrund unserer Meßergebnisse dahingehend argumentieren, daß zwar Verdeckungseffekte ähnlich wie beim Ohr auch bei unserem System Haut des Unterarms plus Cochleamodell auftreten. Eine Zusammenfassung einzelner Erregungsstellen innerhalb einer Frequenzgruppe scheint uns jedoch bei der Haut nicht gegeben zu sein. Dies ist auch verständlich, wenn man die Entstehungsursache der Frequenzgruppe im Ohr an extrem peripheren Stellen annimmt, beispielsweise bereits durch die unmittelbare Übertragung der Flüssigkeitsbewegung auf die Hörhaare der Sinneszellen. Darauf deuten neuere Untersuchungen hin, die bereits in den Mikrophonpotentialen der Ohrschnecke eine Frequenzgruppe erkennen lassen.

Für unser System, welches zur Sprachübertragung geeignet sein soll, scheint jedoch die Frequenzgruppe von untergeordneter Bedeutung zu sein. Bisher konnte noch nicht nachgewiesen werden, daß zur Erkennung von dynamisch sich ändernden Mustern die Frequenzgruppe irgendeine Bedeutung hat, zumal sie stets eine bestimmte Zeit benötigt, um sich aufzubauen.

Meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. W. D. Keidel darf ich an dieser Stelle für die Überlassung der Arbeit ergeben danken!

Mein Dank gebührt auch in besonderem Maße Herrn Dr. Ing. Manfred Spreng, der jederzeit zu helfen bereit war, wenn es darum ging, die verfahrenstechnisch und theoretisch nicht unerheblichen Schwierigkeiten des Themas zu meistern.

LITERATURVERZEICHNIS.

- Bekešy, G.v.: Theorie des Hörens, Phys. Zeitschrift 30,
116 - 118 (1929)
- Description of some mechanical properties
of the organ of Corti. J. Acoust. Soc. Amer.
25, 770 - 785 (1953)
 - Human skin perception of traveling waves
similar to those on the cochlea. J. Acoust.
Soc. Amer. 27, 830 - 941 (1955) und Vortrag
in Erlangen
- Feldtkeller, R und Zwicker, E.: Das Ohr als Nachrichten-
empfänger (1956) 13 - 29.
- Hugony, A.: Über die Empfindung von Schwingungen mittels
des Tastsinnes. Z. Biol. 96, 584 (1935)
- Keidel, W.D.: Die Auflagedruck- und Ortsabhängigkeit der
Vibrationsschwellen des Menschen. Pflügers
Archiv 256, 242 - 264 (1952)
- Note on a new System for Vibratory communi-
cation. Perceptual and Motor Skills 8, 250
(1958) (Southern University Press)
 - Grundprinzipien der akustischen und taktilen
Informationsverarbeitung.
Ergebn. Biol. 24, 213 - 246 (1961)
 - Vibrationsreception der Haut.
Studium generale 17, 478 - 493 (1964).
- Raich, R.: Schwellenänderung von Vibrations-, Schmerz-
und Drucksinn nach vibratorischer Ermüdung.
Diss. Erlangen 1952
- Ranke, O.F.: Folgerungen aus der Theorie der Flüssigkeits-
schwingungen in der Schnecke.
Vortrag Deutsche Physiologentagung Göttingen
1949. Ber. ges. Physiol. 139, 183 (1950).
- Setzepfand, .: Zur Frequenzabhängigkeit der Vibrations-
empfindung des Menschen.
Z. Biol. 96, 236 (1935).

Wilska, A.: On the vibrational sensitivity in different regions of the body surface. Acta Physiol. scand. 31, 285 - 289 (1954).

Zwicker, E.: Die Verdeckung von Schmalbandgeräuschen durch Sinustöne. (Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart. (1954).

ANHANG.

3x BSY 53

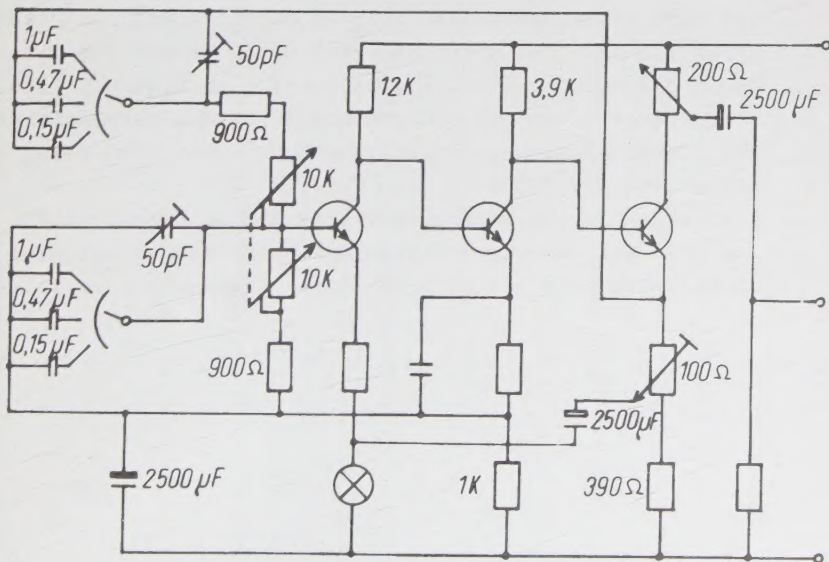


Abbildung 19. Schaltbild eines der verwendeten Tieftonsinusgeneratoren.

LEBENS LAUF.

Am 12. Mai 1940 wurde ich, Rudolf Karl Hans Weinzierl, als 2. Kind des Staatsanwaltes Hans Weinzierl und seiner Ehefrau Fanny Weinzierl, geborene Schreyer, in Regensburg geboren.

Am 1. September 1946 kam ich in die Volksschule in Regensburg. Ab Herbst 1950 besuchte ich den altsprachlichen Zweig des Neuen Gymnasiums in Regensburg, den ich nach längerer Unterbrechung im Sommer 1960 mit dem Reifezeugnis verließ. Seit November 1960 studierte ich dann an der Universität Erlangen Medizin.

Im Juli 1961 bestand ich das medizinische Vorphysikum, im Februar 1963 das medizinische Physikum. Ab Sommersemester 1964 begann ich mit dem Studium der Zahnheilkunde, wo ich nach dem Wintersemester 65/66 das Physikum ablegte. Ebenfalls nach dem Wintersemester 65/66 begann ich mit dem medizinischen Staatsexamen, das ich am 6. August 1966 bestand. Am 8. November 1968 beendete ich das zahnmedizinische Staatsexamen und erhielt am 6. Dezember 1968 meine Bestallung als Zahnarzt.

Zum Doktor der Medizin promovierte ich am 8. April 1967. Zur Zeit bin ich als Medizinalassistent an der Medizinischen Poliklinik der Universität Erlangen-Nürnberg tätig.



Buchdruckerei Ludwig Müller Erlangen Fahrstraße 5